

位相差スペクトル分布による音源までの距離推定

日大生産工 ○霜山 竜一

1.1 はじめに

視覚障害者でも両耳聴によって、到来する音の、前後を含めた空間的な方向や音源までの距離を、ある程度まで推定できることが知られている。このことは異なる2箇所での音圧に音源の3次元分布に関する情報が含まれることを意味する。筆者は、両耳聴で得た音情報から音源の3次元分布を把握する仕組みをコンピュータで模擬することにより、脳で音環境を把握する際の聴覚情報処理の仕組みの一端を明らかにする研究を行っている。本報では聴覚による距離推定について検討した。両耳で距離を推定するための音の特徴に関して心理物理学実験による多くの提案がなされている[1]。Bronkhorstらは直接音と反射音のエネルギー比の距離推定における重要な役割について指摘している[2]。距離検出に関して高橋らは、残響音場内の1箇所で測定された音のインパルス応答から求めた最小位相成分の周波数特性に音源・受音点の比較的近距离($\sim 1.6\text{m}$)の情報が含まれることを指摘している[3]。異なる2箇所における音波の到達時間差あるいは位相差から、三角法で音源までの距離を推定する方法は、反響のある場合に著しく推定精度が低下する。2箇所の音圧を用いて遠方にある音源までの距離($\sim 3\text{m}$)をコンピュータで高精度に推定する試みは前例がない。筆者はこれまで、一対のマイクロホンを用いて得られた音圧の位相差スペクトル分布の傾きを利用して、前方に位置する1音源の方向を高精度に推定す

る方法を提案した[4]。またメンフクロウが水平方向の音源定位に用いるメカニズム[5]を周波数領域に適用したアルゴリズムで、反響のある室内で複数音源を定位できることを示した[6]。さらに、これを2次元に拡張したアルゴリズムで2対のマイクロホンを用いて広帯域音源のカラーの画像化を行った[7-9]。また音圧の位相差スペクトルを統計的に定量評価することで一対のマイクロホンを用いた音の前後検出が可能なことを示した[10]。

本報告では、室内でスピーカから連続的に発生させた広帯域雑音を1対の無指向性マイクロホンで検出し、音圧の位相差スペクトル(クロスパワースペクトルの位相)を求めた。位相差値のばらつきを標準偏差で表した場合に、標準偏差値の平均値がマイクロホンとスピーカ間距離にほぼ比例する特徴を利用して、スピーカまでの距離が比較的高精度に推定できることを示す。

2 検出・評価法

図1に示すように、室内の中央部に設置した1対の無指向性マイクロホン正面の、距離Dだけ離れた位置に音源を設置する。音源がY軸上に位置するかぎり、音源から直接両マイクロホンに到達する音(直接音)の伝搬距離は等しいため、距離に拘わらず位相差はゼロとなる。これは直接音の位相差が距離に依存しないことを意味する。一般に、音源から発生した音は周囲に広がり壁や天井、床などで反射し

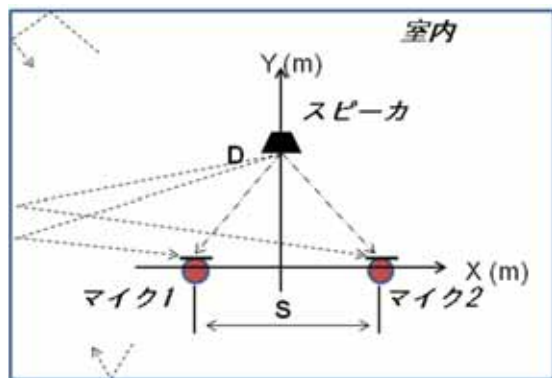


図1 スピーカとマイクロホンの配置

た後にマイクロホンに到達する（反射音）。反射音の場合は各マイクロホンまでの伝搬距離が異なるため位相差はゼロにはならない。室内の音源から広帯域雑音を連続的に発生させた場合に得られる音圧の位相差の周波数特性には連続性がほとんどなく、位相差値はゼロ近傍でばらつく傾向がみられる。本法ではこのばらつきを利用して音源までの距離を推定する。距離を推定するためのアルゴリズムを図2に示す。同時検出された2系統の音響信号をDFT後に位相差スペクトルを求める。位相差スペクトルの周波数帯域幅 Δf に含まれる $2n+1$ 個の位相差値の標準偏差を中心周波数 f_i を変えながら(1),(2)式から求める。周波数 f_i における標準偏差 ρ_i は、

$$\rho_i = \sqrt{\frac{1}{2n+1} \sum_{j=i-n}^{i+n} (\varphi_j - \bar{\varphi}_i)^2} \quad (1)$$

$$\bar{\varphi}_i = \frac{\sum_{j=i-n}^{i+n} \varphi_j}{2n+1} \quad (2)$$

で与えられる。ここで φ_j は周波数 f_j における位相差、 $\bar{\varphi}_i$ は帯域幅 Δf 内の位相差の平均値である。上記操作によって得ら

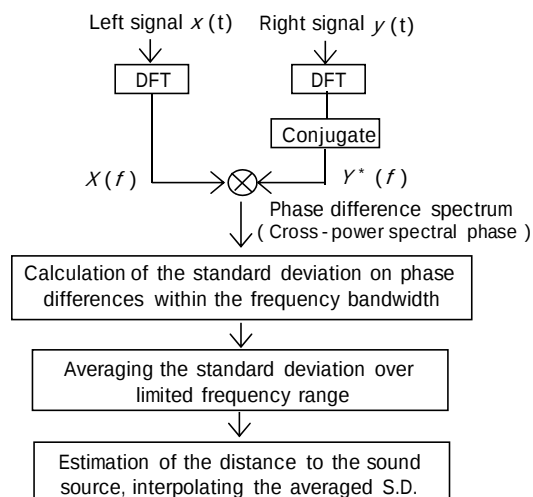
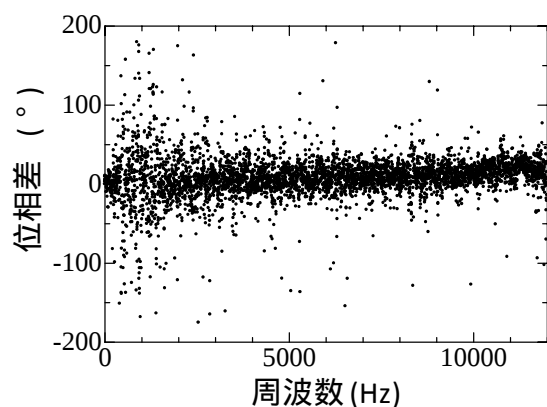


図2 アルゴリズム

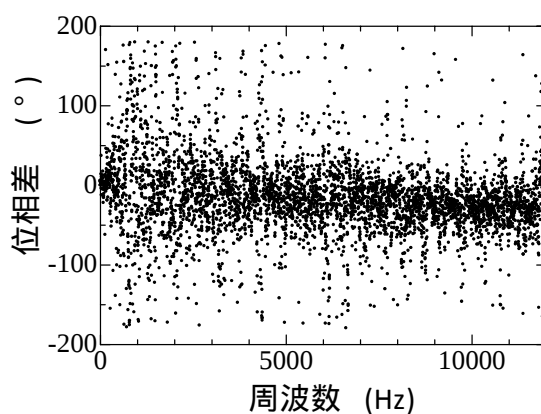
れた標準偏差の周波数特性の、周波数帯域($f_1 \sim f_2$)における平均値を音源までの距離を示す特徴量とみなす。マイクロホンと音源間の距離とこの特徴量の関係を実測して求め近似関数を算出する。音源までの距離は、測定された位相差スペクトルからこの近似関数を用いて推定される。

3 実験結果

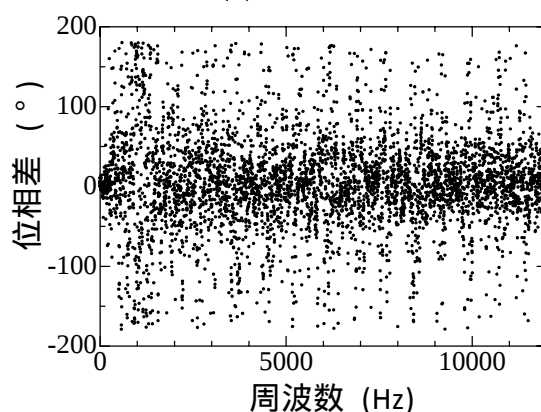
室内でマイクロホン(Type 4190 B&K 製)を水平方向に 20cm(= S)離して配置した(残響時間 0.2s) . 24 ビット分解能の A/D 変換ボード(PCI-4474,N.I.製)を装備した PC (GX280,DELL 製)で 2 系統の音響信号を同時収録した . Δf は 0.8kHz ($n = 160$)である . サンプル周波数は 24kHz でハニング窓を用い 1 フレームは 9600 個のデータを含む . 図 3 はマイクロホンとスピーカ間距離をそれぞれ(a) 1m , (b) 2m , (c) 3m に設定して測定された音圧の位相差スペクトルである . いずれも位相差値はゼロにならず , 距離が遠いほど -180 ° から +180 ° まで広く分布する様子が分かる . 低い周波数ほど広く分布する傾向がみられた . マイクロホンは直接音と反射音の合成された音を検出するため , 位相差値の不規則な変動は壁や床



(a) $D = 1 \text{ m}$



(b) $D = 2 \text{ m}$



(c) $D = 3 \text{ m}$

図3 位相差スペクトルの実測値

面による反射音に起因するものと考えられる。図3にみられる位相差値のばらつきを標準偏差で表しその周波数特性を求めた(図4)。多少の変動がみられるが概ね、周波数が高いほど標準偏差値は減少する傾向にある。また距離が離れるほど標準偏差は高い値を示した。これは、音源が遠方に位置するほど、様々な方向から到来する反響音が位相差値に顕著な影響を与えることを意味し、Bronkhorstらが指摘した直接音と反射音のエネルギー比による直接的な効果を示すものと考えられる。3種類の周波数帯域(5~7kHz, 7~9kHz, 9~11kHz)における標準偏差の平均値と距離の関係を図5に示す(図4に対応)。いずれの周波数帯域で平均しても、標準偏差の平均値は距離にほぼ比例することが分かる。帯域9kHz~11kHzで平均した標準偏差値は、それより低い周波数帯域で平均した場合より、より線形な関係が得られた。この帯域のデータを最小二乗法で近似した一次関数は $\sigma = 17.6L - 3.8$ であり、近似関数から求めた距離と実測値との誤差は $\pm 0.06\text{m}$ 以下となった。

4. まとめ

2系統の音響信号の同時収録装置を用いた音源・マイクロホン間距離の検出法を提案した。音圧の位相差スペクトルのば

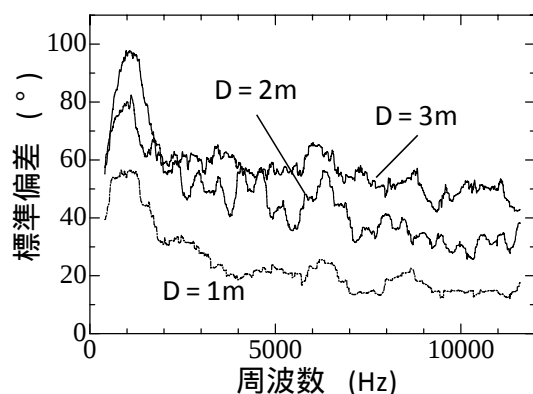


図4 標準偏差の周波数特性

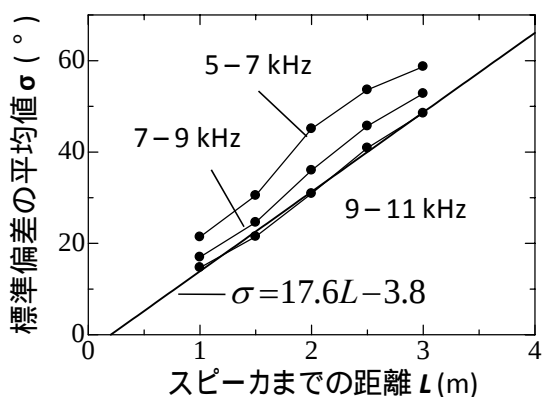


図5 標準偏差の平均値と距離の関係

らつきを標準偏差で表し，標準偏差の周波数特性の平均値と距離の関係を求めた．その結果，

- (1) 標準偏差の周波数特性の平均値は音源とマイクロホン間距離にほぼ比例する
- (2) 標準偏差の周波数特性の平均値と音源とマイクロホン間距離の関係を近似した関数を用いて音源までの距離が $\pm 0.06\text{m}$ の誤差で推定できる

ことなどが分かった．位相差スペクトルのばらつきは部屋の残響時間に依存するものと考えられる．

今後は，音源が，壁面近傍に位置する場合やマイクロホン正面にない場合などについて検討する予定である．また残響時間と推定距離の関係を明らかにしたい．これまで蓄積してきた，音源の2次元可視化手法，音の前後検出法と本法を統合したシステムを開発し，両耳聴で得た音情報から音源の3次元分布を把握する仕組みをコンピュータで模擬することで、脳で音環境を把握する聴覚情報処理の仕組みの一端を明らかにしたい。

謝辞

一連の研究を筆者にご一任くださった生産工学部山崎 憲教授に感謝致します。

[参考文献]

- 1) P. Zahorik, "Assessing auditory distance perception using virtual acoustics", J.Acoust.Soc.Am., 111 (4) (2002) pp. 1832-1846.
- 2) A.W.Bronkhorst, T.Houtgast, "Auditory distance perception in rooms", Nature, 397 (6719) (1999) pp. 517-520.
- 3) 高橋，東山，山崎，“残響音場における位相周波数特性と直接音領域”，電子情報通信学会誌，A，J89-A，4，(2006) pp.291-297.
- 4) R. Shimoyama, K. Yamazaki, "Acoustic source localization using phase difference spectrum images", Acoust. Sci. & Tech., 24, 4 (2003) pp. 161-171.
- 5) M. Konishi, "Study of localization by owls and its relevance to humans", Comp. Biochem. Physiol., 126, A (2000) pp. 459-469.
- 6) R. Shimoyama, K. Yamazaki, "Multiple acoustic source localization using ambiguous phase differences under reverberative conditions", Acoust. Sci. & Tech., 25, 6 (2004) pp. 446-456.
- 7) R. Shimoyama, K. Yamazaki, "2-D acoustic source images using ambiguous phase differences under reverberative conditions" Proceedings of Complex Systems, Intelligence and Modern Technology applications, PHS-1-2 (2004) pp.82-88.
- 8) R. Shimoyama, K. Yamazaki, "Visualization of Tapping Sound on Concrete Wall using Ambiguous Phase Differences", System Modeling and Simulation, Theory and Applications, ASC 2006 (2006) pp. 332-336.
- 9) R. Shimoyama, K. Yamazaki, "Computational acoustic vision by solving phase ambiguity confusion", Acoust. Sci. & Tech. (2009) 採録決定
- 10) 霜山，山崎“前・後方から到来する音の位相差スペクトル分布”，電子情報通信学会総合大会講演論文集，D-12-107 (2008) p.238